



## Doctoral Thesis

# Swissair FuelFerry Optimierungsprogramm ein Netzwerkalgorithmus zur Bestimmung von Kostenminimalen, verallgemeinerten Flüssen

**Author(s):**

Polymeris, Juan Pedro

**Publication Date:**

1985

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000361734> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

SWISSAIR FUEL FERRY  
OPTIMIERUNGSPROGRAMM

EIN  
NETZWERKALGORITHMUS ZUR BESTIMMUNG VON  
KOSTENMINIMALEN, VERALLGEMEINERTEN FLUESSEN

ABHANDLUNG  
zur Erlangung des Titels eines  
DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN  
der  
EIDGENOESSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZUERICH

vorgelegt von

JUAN PEDRO POLYMERIS  
dipl. Masch.-Ing. ETHZ  
geboren am 1. Dezember 1949  
von Zürich

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. F. Weinberg, Referent  
Prof. Dr. P. König, Korreferent

## ZUSAMMENFASSUNG

Seit Beginn des Jahres 1974 (Versorgungskrise der Jahre 1973 und 1974) arbeiten verschiedene Fluggesellschaften, unter anderem auch die Swissair, an der Entwicklung und an der Implementation von Strategien zur Minimierung der Betankungs-Kosten unter Anwendung von Methoden des Operations-Research und der Informatik.

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein Verfahren des Verfassers zur Lösung des sogenannten Fuel-Ferry-Problems. Das entsprechende Optimierungsprogramm ist bereits realisiert und in der Praxis implementiert worden.

Im Streckennetz grösserer Fluggesellschaften sind die für eine vorgegebene Planungsperiode und pro Station vertraglich vereinbarten Abnahmemengen zum Teil stark restriktiv. Ausserdem gelten für die verschiedenen Stationen unterschiedliche Treibstoff-Preise. Weiterhin besteht für jede Station im Streckennetz die zusätzliche Möglichkeit eine beschränkte Fuel-Menge vom "Spotmarkt" (z.B. freier Markt in Rotterdam) zu beziehen. Der entsprechende Preis wird in diesem Fall jedoch mit einem grossen Zuschlag versehen sein.

Um den Flugplan aufrechtzuerhalten und/oder um grosse Preisdifferenzen auszunützen, wird auf bestimmten Streckenabschnitten, zusätzlich zu der für den betreffenden Streckenabschnitt benötigten minimalen Verbrauchsmenge plus Reserve, Treibstoff transportiert. In der Praxis wird diese zusätzliche Betankungsmenge Ferry-Menge genannt (aus dem Englischen "ferry": Überführen).

Andererseits impliziert eine grosse Ferry-Menge einen nicht vernachlässigbaren Mehrverbrauch an Treibstoff, als Folge einer Erhöhung des Gesamtgewichts. Ferry soll also zum Ausdruck bringen, dass im hier vorliegenden Streckennetz, anders als im Falle der klassischen Transportaufgabe, die an der Quelle ursprünglich aufgetankte Ferry-Menge nicht gleich der am Zielort verbleibenden Ferry-Restmenge ist.

Das Ziel des Verfahrens ist die Bestimmung von operationellen, kostenminimalen Ferry-Mengen pro Abschnitt im Streckennetz und einzelner Flugzeug-Einsatz (II). Diese Ferry-Mengen sind diejenigen Empfehlungen, welche wir in der Praxis an die Cockpitbesatzungen weitergeben (für einen bestimmten DC/10-Einsatz von New-York nach Boston gilt z.B.: Ferry = 23'000 kg).

Diese Ferry-Strategien sollen also für eine kurzfristige Planungsperiode gültig sein und entsprechende Preise berücksichtigen sowie vorgegebene Restriktionen, wie untere- und obere Treibstoff-Zuteilungen pro Station, Frachtzuladung, maximales Landegewicht, etc. einhalten. Das Fuel-Ferry-Problem werden wir vorerst als Problem der linearen Programmierung formulieren. Wir werden also das mathematische Modell aufbauen und stark vereinfacht aufzeigen, welche betriebliche Anforderungen und technische Randbedingungen im Falle der Swissair einzuhalten sind (III.1).

Danach werden wir dieses Problem als verallgemeinertes Netzwerkfluss-Problem formulieren und dazu ein effizientes Lösungsverfahren aufzeigen (III.2 und III.3). Je nach der aktuellen, weltweiten Versorgungs- und Preissituation auf dem Treibstoffmarkt wird eine Minimierung der Fuel-Kosten (III.3.1) oder eine Minimierung des Fuel-Verbrauchs formuliert (III.3.1). Ausserdem definieren wir in dieser Arbeit zusätzlich eine Ersatzziel-funktion und einen zugehörigen "Gleichgewichtspunkt" im Sinne einer effizienten Kosten/Treibstoff-Kompromisslösung (III.3.3).

Ein ganzes Kapitel der vorliegenden Arbeit befasst sich ausschliesslich mit der Anwendung des Ferry-Programms [26] (bzw. [24]) in der Praxis (IV: Operationelle Aspekte in der Swissair-Praxis). Das Ferry-Modell basiert auf Erfahrungen, welche der Verfasser in den vergangenen fünf Jahren als Operations-Research Ferry-Beauftragter in der Swissair gesammelt hat. Die wirklich garantierte, praxisbezogene Weiterverwendung und operationelle Realisierung der kurzfristigen Ferry-Empfehlungen ist der relevanteste Vorteil des Swissair Ferry-Programms gegenüber Lösungsansätzen anderer Fluggesellschaften. Wie wir zeigen werden ist die Optimallösung "stabil", "konzis", "transparent" und berücksichtigt "wirtschaftliche" wie auch "ökologische" Aspekte (diese Begriffe werden in der Arbeit erklärt). Weiterhin ist die Ferry-Politik immer so formuliert, dass eine anschliessende Berechnung der Einzelflugpläne (in der Praxis sogenannte "flight plans") in der Praxis nicht erschwert wird (II und VI).

Darüberhinaus ermittelt die Lösung des in dieser Arbeit behandelten Ferry-Problems eine "optimale", langfristige Verteilung beschränkter Treibstoffvorräte auf bestimmte Stationen im Streckennetz und auf einzelne Flugzeug-Einsätze bei Berücksichtigung gegebener, für eine längere Planungsperiode (z.B. ein bis drei Monate) gültigen Preisen, und unter Einhaltung der technischen und betrieblichen Restriktionen. Diese Resultate bilden eine Entscheidungshilfe für die Festlegung zukünftiger Verträge mit den verschiedenen Lieferanten und wirken sich somit aus in der nachfolgenden Planungsphase.

Für die Fluggesellschaften sind bereits über 25% der gesamten Betriebskosten Treibstoffkosten (Swissair ca. 640 Mio. SFr.).

Durch eine konsequente Verfolgung einer kostenminimierenden Ferry-Politik können ohne weiteres bis zu acht Mio. SFr. pro Jahr eingespart werden.

Im Falle einer wirklich prekären Versorgungssituation lassen sich die zu erzielenden Einsparungen jedoch kaum abschätzen: stark restriktive, zum grossen Teil nicht ausreichende Zuteilungen sowie schnelle Preisbewegungen mit grossen Differenzen treffen dann gleichzeitig zu. In diesem Fall wird es den Gesellschaften darum gehen, überhaupt eine zulässige (in diesem Fall eine verbrauchsminimale) Lösung zu finden, oder im Extremfall schnell zu entscheiden, welche Flüge zu annullieren sind (II und III,3).

Zur Lösung des Fuel-Ferry-Problems verwenden wir ein Netzwerkalgorithmus zur Bestimmung von kostenminimalen, verallgemeinerten Flüssen (V).

Die mathematische Formulierung dieses Optimierungsverfahrens (und der entsprechende mathematische Beweis) können wir einem Buch von Herrn Prof. K. Hässig [13] entnehmen (angegeben im Literaturverzeichnis).

Ausserdem werden wir zwei in der Praxis mögliche alternative Lösungsansätze aufzeigen, welche sich vereinfacht als gewöhnliche Flussmaximierungsaufgaben (d.h. ohne Multiplikatoren auf den Bögen) lösen lassen (V.4).

In der vorliegenden Arbeit ist zudem eine vollständige Beschreibung des Netzwerkflussalgorithmus (mit Name "LOSSY") zu finden und zwar ist dieses "Programm" in einer der Programmiersprache Pascal sehr ähnlichen Syntax geschrieben (V.3). Im Sinne einer Programm-Übersicht ist zusätzlich ein direkt compilierbares Pascal"-Programm (LOSSY in Kurzform) zu finden (V.3.3). Ausserdem sind einige programmiertechnische Ueberlegungen erwähnt, welche spätestens dann nützlich sind wenn man das Programm in der Praxis einsetzen will (V.3.4). Als Ergänzung und als Beispiel wird noch eine einfache, verallgemeinerte Netzwerkfluss-Aufgabe (d.h. mit Multiplikatoren auf den Bögen) gelöst (V.3.5). An dieser Stelle sei noch vermerkt, dass das Optimierungsverfahren ohne weiteres als Baustein zur Lösung von weiteren (verallgemeinerten) Transshipment-Aufgaben mit positiven Durchfluss-Multiplikatoren eingesetzt werden kann (V.3.5).

Eine Verkaufsversion dieses Programms ist bereits bei sechs weiteren Fluggesellschaften implementiert worden und hat sehr gute Marktaussichten für die kommenden Jahre, vor allem als Baustein zur Optimierung und vollständig integriert in grössere "Flight Planning"-Systeme (VI).

A B S T R A C T

Since the beginning of 1974, precipitated by the fuel supply crisis of 1973 and 1974, various airlines including Swissair have been working on the development and implementation of cost reducing fueling strategies using operations research methods in combination with computer sciences.

The accompanying study describes one of the author's procedures for the solution of the so-called Fuel-Ferry-Problem. The associated optimisation program has already been written and implemented.

For a given period, the world-wide networks of the larger airlines and their individual stations generate serious problems because of the restrictive nature of the contractually agreed quantities of fuel which have been ordered. In addition, the various stations often have very different fuel prices. Further, each station has the ability to draw a limited amount of fuel from the 'spot market' (e.g the free market in Rotterdam). This fuel is then sold with a large 'mark-up'.

To operate the flight schedule as planned, and/or to take advantage of the sizeable price differentials between stations, fuel over and above that required for a particular leg (plus reserves) will be transported. In practice, this additional quantity is called ferry-fuel (or fuel tankering).

However, the transportation of this ferry-fuel is penalised in the additional burn caused by the increased weight of the aircraft. The use of the word 'ferry' is intended to draw attention to the fact that, contrary to the classical transport concept, the amount of additional fuel remaining at the end of the flight is not the same as that loaded.

The aim of this procedure is the definition of operational, cost-reducing fuel quantities per flight leg and specific aircraft schedules. These ferry-fuel quantities are recommendations which in practice are given to the cockpit crew (for example, for a particular DC-10 flight from New York to Boston, the ferry-fuel is 23,000 kilos).

Therefore, this ferry-strategy should be valid for a short planning period, consider current prices and should take into account given restrictions, such as maximum and minimum fuel allocations per station, minimum fuel required to complete the flight leg, maximum and reserve capacities of the aircraft, optional ferry restrictions, freight to be loaded, maximum landing weight and other technical constraints, etc. Initially we shall formulate the Fuel-ferry-Problem as a problem in linear programming. That is, we shall construct a mathematical model, and in a simplified form, show what operational requirements and technical constraints are to be observed in Swissair's case.

Next, we shall formulate the problem as a generalised, minimal cost network flow problem (a generalised transshipment approach) and develop an efficient procedure for its solution. Dependent on the current world-wide supply and price situation in the fuel market, a minimisation of fuel costs or a minimisation of fuel use will be formulated. Besides this, we shall define a mixed-criteria objective function and achieve the associated compromise representing an efficient cost/fuel relationship.

For the commercial airlines there is an implicit conflict between minimising consumption and maximising financial savings.

A fuel-minimum solution to the ferry-problem can be achieved by a combination of the following measures: 1.) short-term spot purchases to ease over restricted allotments, 2.) modification of flight schedules or even reducing frequencies in the event of extremely restrictive supply conditions, 3.) strictly limited ferry-fuel with particular attention to ecological, fuel-conserving aspects, etc.

On the other hand, a maximum gain solution will attempt to make full use of the following decision space: 1.) observance of long-term delivery contracts at prices way below the spot market quotations, 2.) operation of all flights without changing flight schedules, 3.) unrestricted ferry-fuel to extract the most profit from price differentials. The users are able to determine objective functions themselves through the selection of their own parameters.

A whole chapter of this study is devoted to the practical application of Swissair's ferry-program. The ferry-model is based on experience gained by the author during the last five years when he was responsible for operational research in ferry-problems in Swissair. The most relevant advantage of the Swissair ferry-program in comparison with other models is that the user is assured of continued practice in the employment and operational use of the results in short-term recommendations for ferry-fuel (particularly as regards the relaying of ferry recommendations to the pilots).

As we shall see, the optimisation is 'stable', 'concise', and 'transparent', and respects 'economic' as well as 'ecological' aspects (these terms are to be explained in this study). It is also to be remarked that the ferry-policy is so formulated that the subsequent calculation of individual flight plans is not made more complicated or difficult.

Further to the above the solution to the ferry problem as described in this study provides an optimal long-term distribution of restricted fuel reserves over individual stations and for specific aircraft schedules. This is done using prices which are valid for a longer period (for instance, 1 to 3 months) with full regard for technical and operational restrictions. These results go to make up a powerful decision support tool for use in negotiations with fuel suppliers, and thus have a marked influence in the subsequent planning period.

Airlines find today that fuel prices represent over 25% of their total annual costs (in Swissair's case, about 640 million Swiss francs). By pursuing a consistent policy of cost-reducing ferry-fuel practices, it would be possible to save up to 8 million Swiss francs per year. If a really precarious fuel supply situation arises, the possible savings can hardly be estimated. At this point, the highly restrictive and in part, inadequate, distribution, coincides with wildly fluctuating prices. The airline must then be concerned to find a feasible (in this case minimum-fuel) solution or, in the extreme case, to decide quickly which flights must be cancelled.

The Swissair-ferry-program not only generates global financial savings but also reduces fuel needs through optimal long-term planning and above all by preventing wrong decisions, as e.g.: ferrying fuel over a very long distance to a station where allotments are restricted when another solution exists that would be more profitable and use less fuel.

The solution of the ferry problem is based on a generalised, minimal cost network flow algorithm.

The mathematical formulation of this optimising routine, and its mathematical proof, can be taken from the work of Professor K. Haessig (Hässig, K.: Graphentheoretische Methoden des Operations Research, Teubner Studienbücher, Mathematik, Bd. 42 (1979), page 97 ff).

Apart from this, we shall formulate two alternative procedures which are solved as normal maximum flow problems (that is, without gains or losses on the arcs).

In this study, a complete description of the network flow algorithm (under the name "LOSSY") can be found, written in a syntax close to that of Pascal. A Pascal program is also provided in a form which can be directly compiled ("LOSSY" in coded form). Also, some program-oriented considerations are discussed which are useful at a later point when the program is put into practice. As enhancement, and as an example, a simple generalised network flow problem (with gains and losses on the arcs) is included. It should be mentioned at this point that the optimising procedure can be set up as a foundation for the solving of further (generalised) transshipment problems with positive gains and losses on the arcs.

A version of this program is already available for sale and has been implemented by six other airlines. It has very good prospects for sales in the coming years, above all, as a corner-stone in optimising procedures, and as an integral part of a more extensive flight-planning system.

#### DANKADRESSE

Für die grosszügige Unterstützung dieser praxisbezogenen Arbeit und die vielen wertvollen Anregungen in ihrem Verlauf möchte ich dem Vorsteher des IFOR, Herrn Prof. Dr. F. Weinberg herzlich danken.

Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. P. König, Vizedirektor und seinerzeit Chef der Hauptabteilung Materialwesen, der durch die Uebernahme des Korreferats und seiner Betreuung innerhalb der Swissair grosses Interesse an meiner Arbeit bekundet hat.

Herrn Prof. Dr. K. Hässig bin ich für ausschlaggebenden Hinweise auf spezielle Lösungsverfahren verallgemeinerter Netzwerke; meinem Bruder, Dr. A. Polyméris, für seine Betreuung und für tausend anregende Diskussionen und den Herren PD Dr. H.-J. Lüthi und Dr. J. Mayer (IFOR) für ihre stets motivierende Unterstützung zu Beginn meiner Arbeit sehr dankbar.

Besonderen Dank schulde ich meinem ehemaligen Chef in der Operations-Research Gruppe der Swissair, Herrn U. Läubli, der mich durch viele anregende Diskussionen laufend ermutigt und mir die Gelegenheit gegeben hat das Fuel-Ferry-Problem anzupacken.